

磁性壳聚糖/硅藻土复合材料的制备及吸附特性

单凤君 张婷婷*

(辽宁工业大学 化学与环境工程学院, 锦州 121001)

摘要 采用溶液共混、化学交联和超声分散法制备磁性壳聚糖/硅藻土($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$)复合材料。采用傅里叶红外光谱、扫描电镜和X射线衍射仪对其结构和表面形貌进行了表征。以印染废水中甲基橙为目标污染物,考察了pH、温度和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 投加量对甲基橙吸附的影响,并对其吸附动力学和吸附等温线类型进行了探讨。结果表明:在浓度为20mg/L的甲基橙溶液中,pH为6、温度为30℃、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 投加量为4g/L时,100min达到吸附平衡,甲基橙的平衡吸附容量3.81mg/g。吸附过程符合准二级动力学模型($R^2=0.993$)和Freundlich等温吸附模型,属于多位点的非单分子层吸附。

关键词 磁性壳聚糖,硅藻土,甲基橙,吸附性能

中图分类号 X591

文献标识码 A

文章编号 1006-3536(2021)05-0200-05

DOI 10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.045

Preparation and adsorption capacity of magnetic chitosan/diatomite composite

Shan Fengjun Zhang Tingting

(School of Chemical and Environmental Engineering, Liaoning University of Technology,
Jinzhou 121001)

Abstract Magnetic chitosan/diatomite ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$) composite was prepared by solution blending, chemical crosslinking and ultrasonic dispersion. The structure and morphology of the materials were analyzed by FT-IR, SEM, XRD. Methyl orange (MO) in dye wastewater was selected as target pollutant. The effects of pH, temperature and the dosage of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ on methyl orange adsorption was investigated. The adsorption kinetics and isotherm type were also studied. The experimental results shown that adsorption equilibrium was reached at 100min, the adsorption capacity for methyl orange reached 3.81mg/g in 20mg/L methyl orange solution, when pH 6, temperature 30℃ and the dosage of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 4g/L. The adsorption process conformed to pseudo-second-order model ($R^2=0.993$) and freundlich isotherms adsorption model. The adsorption was related multi-site non-monolayer molecules monolayer.

Key words magnetic chitosan, diatomite, methyl orange, adsorption performance

染料生产和印染废水的持续排放是造成世界范围水污染的重要原因之一。印染废水通常具有较高的色度和化学及生化需氧量。在排放到接受水体之前要进行有效的处理,否则不仅会造成视觉污染,还会威胁到水生动植物。此外,大多数芳香族有机染料在染色过程中具有高度的非生物降解性^[1],因此,开发有效的处理印染废水技术是非常必要的。目前,研究人员开发了多种处理印染废水的方法^[2-4],其中,吸附法因其效率高、成本低、操作简单、无二次

污染等优点,被认为是处理单一类染料最有前途的候选技术之一。

硅藻土具有孔隙率高、体积大、耐化学腐蚀、比表面积大和吸附能力强等优点,被广泛用于吸附剂、助滤剂和载体等方面而用于去除污(废)水及染料废水中的污染物^[5]。但硅藻土颗粒较小易造成溶液中悬浮颗粒的增加及吸附剂的流失。磁性壳聚糖表面多孔且分散、粒径窄、比表面积大、易回收、可再生且表面含有大量的一OH和—NH₂基团,被广泛应用

收稿日期:2020-02-18;修回日期:2021-02-19

基金项目:工业生态与环境工程教育部重点实验室开放课题(KLIEEE-16-07)

作者简介:单凤君(1971-),女,博士,副教授,主要研究方向为环境材料的制备,E-mail:-shanfj@lnut.edu.cn。

通讯作者:张婷婷,E-mail:303779298@qq.com。

于废水处理^[6]。但磁性壳聚糖价格较贵,本研究利用天然硅藻土多孔材料的特性,将硅藻土与磁性壳聚糖复合,制备磁性壳聚糖/硅藻土复合吸附材料,以实现硅藻土在废水中的快速分离,提高壳聚糖在废水中的稳定性,同时降低吸附剂的制备成本。以甲基橙废水为处理对象,研究其对甲基橙废水的吸附性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硅藻土(DE, 40 μ m),天津市福晨化学试剂厂;三氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、甲基橙(MO)、盐酸(HCl),天津市天力化学试剂有限公司;纳米四氧化三铁(Fe_3O_4 , 20nm),上海信帆生物有限公司;壳聚糖(CS)、戊二醛,国药集团化学试剂有限公司。

傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Spectrum T-MGx 型),美国 PE 公司;扫描电子显微镜(SEM, Zeiss Sigma 500 型),美国 FEI 公司;X 射线衍射分析仪(XRD, Rigaku D/MAX PC2500 型),日本理学株式会社;可见分光光度计(721 型),上海仪电分析仪器有限公司;电热恒温干燥箱(GCK3302 型),北京中惠普分析技术研究所;高速冷冻离心机(Avanti JXN-30 型),美国 Beckman Coulter 公司;真空干燥箱(DZF-6030A 型),上海一恒科学仪器有限公司;超声波清洗机(410T 型),深圳市洁拓超声波清洗设备有限公司。

1.2 复合材料的制备

1.2.1 硅藻土的预处理

称取 10g DE 放入 500mL 烧杯中,加入 200~300mL 去离子水,机械搅拌清洗 30min 后静置、沉淀后,置于 110 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中恒温干燥 12h 后,研磨,过 80 目筛,待用。

1.2.2 磁性壳聚糖的制备

称取 2g CS 溶于 50mL 2% 乙酸溶液,机械搅拌使壳聚糖充分溶解后,与 10mL 150g/L FeCl_3 溶液混合均匀;再将 0.8g 纳米 Fe_3O_4 粉末在机械搅拌下与上述溶液混合均匀后,缓慢倒入无水乙醇溶液中,充分搅拌,直至析出大量黑色絮状物,将黑色絮状物抽滤后,50 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥 12h 左右,研磨得到磁性粉末。

将磁性粉末加入到 1% 戊二醛乙醇溶液中,机械搅拌交联反应 2h;然后用磁铁作为外加磁场将交联完成溶液进行固液分离,清洗;50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,真空干燥 12h 左右,研磨得到磁性壳聚糖($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$)。

1.2.3 磁性壳聚糖/硅藻土的制备

将 2g DE 溶于 100mL 4g/L 磁性壳聚糖溶液后,超声分散 30min,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下磁力搅拌 3h 使其充分反应后,在外加磁场下进行固液分离,分离后的固体于 50 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥 12h,研磨过 80 目筛后,制得磁性壳聚糖/硅藻土复合材料($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$)。

1.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的表征

采用 SEM 观察 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附前后的表面形貌结构,加速电压为 5kV;采用 FT-IR 测试 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附前后的特征官能团的结构变化,扫描波数范围为 4000~400 cm^{-1} ;采用 XRD 对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 进行物相测试,管电压 40kV,管电流 40mA,扫描角度为 20~80 $^{\circ}$,扫描速度 4 $^{\circ}/\text{min}$ 。

1.4 MO 的吸附实验

在室温条件下,将 MO 溶于去离子水中,配制不同浓度的 MO 溶液。通过改变 MO 的初始浓度、吸附时间等因素来探究 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对 MO 的去除效果。先外加磁场分离 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$,以 10000r/min 的速度高速离心分离后取 2mL 上清液,用可见分光光度法测定吸光度,吸附量按式(1)进行计算^[7]。

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

式中, q_e 为平衡吸附量,mg/g; C_0 为 MO 的初始质量浓度,mg/L; C_e 为 MO 的平衡质量浓度,mg/L; V 为溶液总体积,L; m 为 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的质量,g。

1.4.1 吸附动力学

取 100mL 20mg/L MO 溶液,加入 2g $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 、转速 150r/min 的条件下置于恒温振荡箱中,从 20~280min 每隔一段时间,迅速用外加磁场分离后取上清液高速离心分离后,用可见分光光度法测定吸光度,计算吸附过程中 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对废水中 MO 吸附量的变化,考察 MO 的吸附动力学特征。使用准一级动力学[式(2)]、准二级动力学[式(3)]和 Weber-Morris[式(4)]扩散 3 种模型进行吸附动力学拟合计算^[8-9]。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

$$q_t = k_p t^{1/2} + C \quad (4)$$

式中, c_0, c_t 分别为初始溶液中 MO 的浓度和 t 时刻溶液中 MO 的浓度,mg/L; v 为含 MO 废水体积,L; m 为 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的质量,g; q_e, q_t 分别为

平衡吸附能力和 t 时刻的吸附能力, mg/g ; k_1 为准一级反应速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级反应速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附时间, min ; k_{ip} 为颗粒内扩散速率常数, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$ 。

1.4.2 等温吸附模型

分别向 5~25 mg/L 的 100 mL 含 MO 废水中加入 2 g $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$, 在 25℃、30℃ 和 35℃ 条件下, 振荡 200 min (150 r/min) 后, 测定溶液的吸光度。采用 Langmuir [式(5)] 和 Freundlich 等温吸附模型 [式(6)] 对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附 MO 等温吸附曲线进行线性拟合。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (5)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{\ln C_e}{n} \quad (6)$$

式中, C_e 为 MO 的平衡时浓度, mg/L ; q_e 为 MO 的平衡吸附量, mg/g ; $q_{\max}$ 为理论最大吸附量, mg/g ; K_L 为 Langmuir 吸附常数, L/mg ; K_F 为 Freundlich 吸附常数, L/mg ; n 为 Freundlich 吸附系数。

2 结果与讨论

2.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的结构性能分析

2.1.1 FT-IR 分析

图 1 为 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的 FT-IR 谱图。

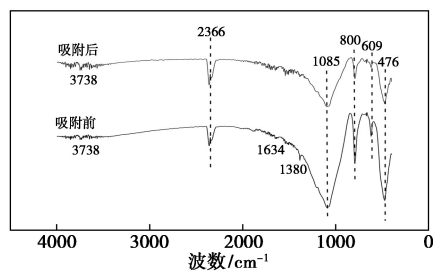


图 1 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的 FT-IR 谱图

由图可知, 476cm^{-1} 和 88cm^{-1} 处为 Si—O 和 Si—O—Si 对称伸缩振动吸收峰, 1085cm^{-1} 处出现较强的吸收峰, 为 Si—O—Si 不对称伸缩吸收峰和 C—O 伸缩振动吸收峰叠加所致^[10-11]。 609cm^{-1} 处为 Fe—O 振动吸收峰, 表明有 Fe_3O_4 存在^[12]。 1634cm^{-1} 和 2366cm^{-1} 处为 C=N—的伸缩振动吸收峰, 表明 CS 中—NH₂ 和戊二醛中—C=O 反应生成席夫碱^[13]。 1380cm^{-1} 处为 CS 中—NH₂ 伸缩振动吸收峰。 3738cm^{-1} 处为 O—H 的吸收峰。由图还可知, 吸附前后 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 中各官能团吸收峰的位置没有发生偏移, 只是吸收后的吸收峰强

度变弱, 表明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对 MO 的吸附以物理吸附为主。

2.1.2 SEM 分析

图 2 为 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的 SEM 图。由图可见, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 为球形结构, 球形规则性较好, 表面不光滑; 由图 2(b) 可以看出, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 是以多孔的 DE 为载体, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 附着其上, 这种结合方式不会引起化学结构的明显变化 (图 1)。

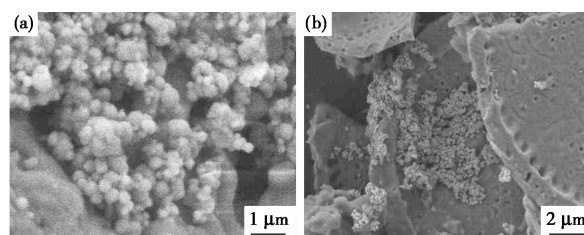


图 2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ (a, $\times 10000$) 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ (b, $\times 5000$) 的 SEM 图

2.1.3 XRD 分析

图 3 为 DE、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的 XRD 谱图。由图可见, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 在 $2\theta = 35.58^\circ$ 、 43.60° 、 62.65° 和 73.16° 处都出现了特征衍射峰, 分别为 Fe_3O_4 (311)、(400)、(440) 和 (553) 的晶面衍射峰^[14-15], 与 (JCPDS 19-629) PDF 卡片中峰位置基本一致, 表明尖晶石结构 Fe_3O_4 被 CS 包裹。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 在 $2\theta = 26.58^\circ$ 、 32.41° 、 35.89° 和 45.08° 处出现了特征衍射峰, 分别为 DE (422)、(406)、(334) 和 (536) 的晶面衍射峰^[16], 与 (JCPDS 49-623) PDF 卡片中峰位置基本一致, 表明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 中确实有 Fe_3O_4 存在, 而且 Fe_3O_4 和 CS 主要吸附在硅藻土表面而没有进入硅藻土的层间结构中。

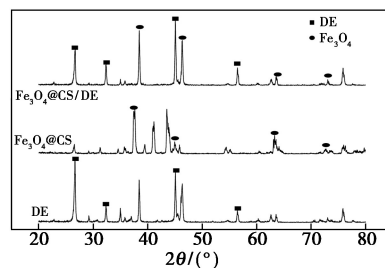


图 3 DE、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 的 XRD 谱图

2.2 吸附性能分析

2.2.1 pH 对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附 MO 性能的影响

在 MO 浓度 20 mg/L , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度

4g/L, 时间 100min, 温度 30℃ 条件下进行吸附实验, 考察 pH 对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附 MO 性能的影响, 结果见图 4。由图可知, pH=3~6, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对 MO 的吸附容量随着 pH 增大而逐渐增加, 吸附容量从 3.33mg/g 增至 3.72mg/g。当 pH 大于 6 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对 MO 的吸附容量随着 pH 增大而显著降低, 当 pH 为 9 时, 吸附容量降至 3.02mg/g。这是因为在酸性环境中, DE 负载 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 表面的一 NH_2 电离为 NH_3^+ , 形成高电荷密度的阳离子基团, 与 MO 中一 SO_3^- 静电吸附。当 pH 大于 7 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 表面的一 NH_2 和一 OH 发生脱质子化, 使 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}$ 表面与 MO 表面阴离子产生排斥, 从而使去除率下降^[17]。

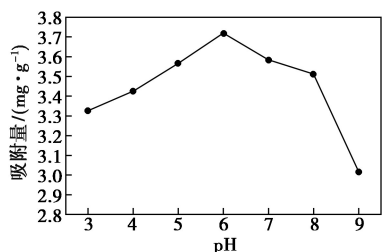


图4 pH对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附MO性能的影响

2.2.2 温度对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附MO性能的影响

在 MO 浓度 20mg/L, pH=6, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度 4g/L 条件下进行吸附实验, 考察温度对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附 MO 性能的影响, 结果见图 5。由图可知, 温度对 MO 吸附容量的影响非常显著。当温度为 30℃ 时, 在全部吸附时间内, 去除率均最高, 当 100min 时, 去除率达到 74.54%, 吸附容量为 3.73mg/g。当温度高于 30℃ 时, 吸附容量显著降低, 而且在 60min 时, 均达到吸附平衡。因此, 吸附是放热过程, 升高温度使正向吸附受抑制, 吸附能力下降。

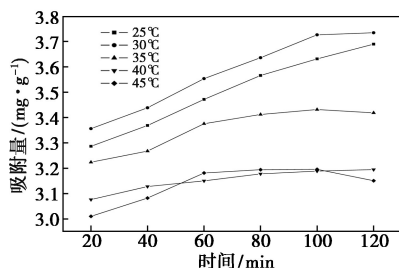


图5 温度对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 吸附MO性能的影响

2.2.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 投加量对其吸附MO性能的影响

在 MO 浓度 20mg/L, pH=6, 30℃ 条件下进行

吸附实验, 考察 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度对其吸附 MO 性能的影响, 结果见图 6。由图可知, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 对 MO 的吸附性能随 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度的增加, 在相同吸附时间内, 吸附容量不断增加。在 100min 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度为 1g/L 时, MO 去除率为 63.71%, 吸附容量为 3.19mg/g; 当 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度增至 4g/L 时, MO 去除率达到 75.61%, 吸附容量为 3.81mg/g。当 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度增加到 6g/L 以上时, 在全部吸附时间内, 吸附容量增加趋势不明显。

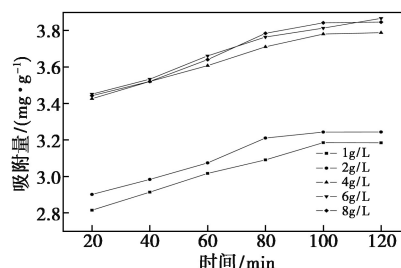


图6 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CS}/\text{DE}$ 浓度对其吸附MO性能的影响

2.3 吸附数据拟合分析

2.3.1 吸附动力学模型

图 7 为准一级动力学、准二级动力学和颗粒内扩散动力学的吸附动力学拟合结果图。由图可见,

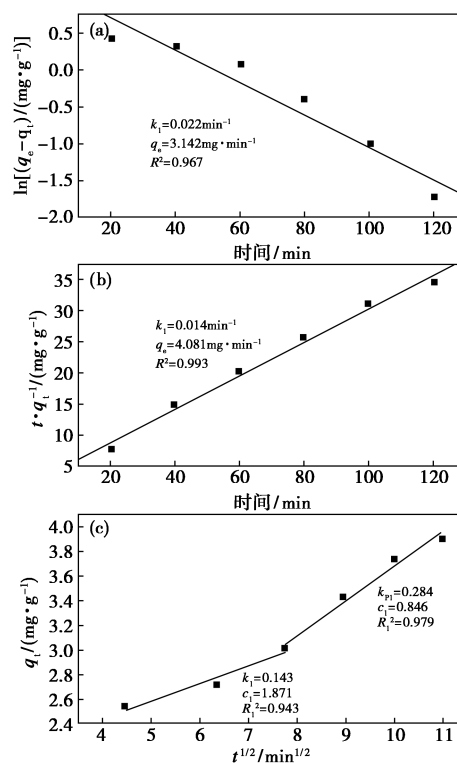


图7 准一级动力学方程吸附MO拟合图(a)、准二级动力学方程吸附MO拟合图(b)和颗粒内扩散方程吸附MO拟合图(c)

准二级吸附动力学模型的拟合效果较好。且准二级吸附动力学模型的相关系数较大, $R^2 = 0.993$ 。且准二级动力学模型计算值 q_e 为 3.911mg/g, 与 q_e 实验值 3.858mg/g 相近。说明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 对 MO 吸附更符合准二级吸附动力学模型。这表明其吸附速率与吸附剂上未被占据的吸附位点的平方成正比^[18]。颗粒内扩散模型进行拟合后, 发现全部数据点范围内 $q_t \sim t^{1/2}$ 作图, 得不到一条拟合直线, 说明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 对 MO 吸附不是颗粒内扩散控制^[9]。

2.3.2 等温吸附模型拟合

Freundlich 和 Langmuir 等温模型在不同温度下的吸附拟合结果见图 8, 拟合参数见表 1。由图表可知, Freundlich 等温吸附模型的拟合效果好。Freundlich 等温吸附模型的相关系数 R^2 值均大于 Langmuir 等温吸附模型, 表明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 对 MO 的吸附与 Freundlich 等温吸附模型更为相符。

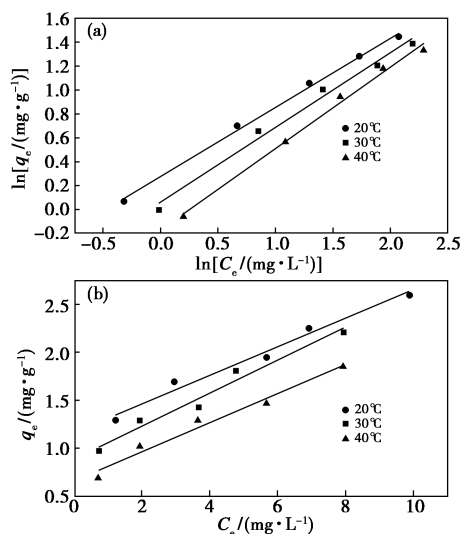


图 8 Freundlich 等温吸附模型(a)和 Langmuir 等温吸附模型(b)的吸附等温线图

表 1 Freundlich 和 Langmuir 等温线模型参数

温度/℃	Freundlich 模型		
	$K_F / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$1/n$	R_F^2
20	1.318	0.579	0.997
30	1.066	0.625	0.989
40	0.841	0.683	0.992
温度/℃	Langmuir 模型		
	$q_{\max} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R_L^2
20	6.573	0.232	0.966
30	5.802	0.195	0.975
40	6.675	0.123	0.978

$1 > 1/n > 0.5$, 且随温度升高而增大, K_F 随温度升高而减小, 表明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 对 MO 吸附反应强度较强, 同时进行多位点的非单分子层吸附^[14]。

3 结论

(1) $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 是一种较好的阴离子染料吸附剂。当 pH 为 6, 温度为 30℃, $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 投加量为 4g/L 时, MO 的去除率达到 75.61%, 吸附容量为 3.81mg/g。

(2) $\text{Fe}_3\text{O}_4@CS/DE$ 对 MO 的吸附符合准二级动力学模型, $R^2 = 0.993$, 且准二级动力学模型计算值 q_e 为 3.911mg/g, 与 q_e 实验值 3.858mg/g 相近。吸附等温线更符合 Freundlich 模型。

参考文献

- [1] 孟波, 郭巧霞, 王凯. 复合改性膨润土对亚甲基蓝的吸附性能研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(2): 35-39.
- [2] Adepu A K, Goskula S, Chirra S. Magnetically separable porous titanasilicate/ Fe_3O_4 hybrid nanocomposites with enhanced photocatalytic performance under UV light irradiation [J]. Journal of Porous Materials, 2019, 26(5): 1259-1267.
- [3] 廉帅唯, 王旭东, 郭利妍. 锐钛矿型光催化剂 LaAlO_3 制备及光催化性能研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(1): 48-53.
- [4] 任逸, 施梦琦, 尹越. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MIL-53(Al)}$ 催化类芬顿氧化性能及其作用机制研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(8): 2508-2516.
- [5] 盘雨凝, 师欢, 李男. 纳米 TiO_2 /硅藻土复合材料制备及亚甲基蓝降解[J]. 非金属矿业, 2019, 42(5): 98-100.
- [6] 颜世强, 张洪才, 付豪. 磁性壳聚糖重金属吸附剂的制备及其吸附性能的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 739-747.
- [7] 律志民, 杨世民, 陈磊. 高性能的 MOF/carbon 复合材料对水溶液中铈的吸附[J]. 核化学与放射化学, 2019, 41(2): 2-10.
- [8] 谭雪云, 李冰, 李平. 纳米羟基铁改性阳离子树脂制备及去除 $\text{Cd}(\text{II})$ [J]. 水处理技术, 2019, 45(6): 56-61.
- [9] Jodeh S, Shawahny M, Hanbali G. Efficiency of magnetic chitosan supported on graphene for removal of perchlorate ions from wastewater [J]. Environmental Technology, 2019, 40(8): 1-14.
- [10] Naeimi H, Lahouti S. Magnetic nanoparticles coated with a chitosan anchored Schiff base complex of nickel(II) as an effective, reusable catalyst for one pot synthesis of spiroacetones [J]. Transition Metal Chemistry, 2018, 43(1): 221-229.
- [11] Sun Lingmin, Wang Jinshu, Wu Junshu, et al. Constructing nanostructured silicates on diatomite for $\text{Pb}(\text{II})$ and $\text{Cd}(\text{II})$ removal [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(2): 6882-6894.